凹土纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能、器官指数及血液生化指标的影响

毛俊舟[1] 董 丽[1] 王淑楠[1] 彭 众[1] 仲召鑫[1] 屈国敏[2] 喻礼怀[1*]

（1.扬州大学动物科学与技术学院，扬州 225009；2.溧阳市动物疫病预防控制中心，常州 213300）

摘 要：本试验旨在研究饲粮中添加凹凸棒土负载纳米氧化锌(凹土纳米氧化锌)对断奶仔猪生长性能、器官指数及血液生化指标的影响。试验选取 210 头 21 日龄体重相近[(6.30±0.51) kg]的健康杜×长×大断奶仔猪，随机分为 7 组，每组 6 个重复，每个重复 5 头猪。对照组（CON 组）饲喂基础饲粮，抗生素组（ANT 组）饲喂基础饲粮+100 g/kg 50%喹乙醇+150 g/kg 15%金霉素+50 g/kg 10%硫酸黏菌素，氧化锌组（ZO 组）饲喂基础饲粮+3 000 mg/kg 氧化锌，纳米氧化锌组（NZO 组）饲喂基础饲粮+800 mg/kg 纳米氧化锌，低凹土纳米氧化锌组（LA-ZO 组）饲喂基础饲粮+700 mg/kg 凹土纳米氧化锌，中凹土纳米氧化锌组（MA-ZO 组）饲喂基础饲粮+1 000 mg/kg 凹土纳米氧化锌，高凹土纳米氧化锌组（HA-ZO 组）饲喂基础饲粮+1 300 mg/kg 凹土纳米氧化锌。试验预试期 3 d，正试期 9 d。结果表明：1）与 CON 组相比，饲粮添加凹土纳米氧化锌显著提高断奶仔猪平均日采食量和平均日增重（$P<0.05$）。2）LA-ZO 组腹泻率与 CON 组、ANT 组相比显著降低（$P<0.05$），LA-ZO 组腹泻指数相比于 CON 组、ANT 组和 NZO 组均显著降低（$P<0.05$）。3）LA-ZO 组和 MA-ZO 组胰腺指数与 NZO 组相比显著提高（$P<0.05$）。4）与 CON 组相比，MA-ZO 组血液总胆固醇（TC）和甘油三脂（TG）含量显著降低（$P<0.05$），血液高密度脂蛋白（HDL）含量显著提高（$P<0.05$），且显著高于 ANT 组和 NZO 组（$P<0.05$）；HA-ZO 组血液 HDL 含量显著高于 CON 组和 ANT 组（$P<0.05$）。结果显示，在断奶仔猪饲粮中添加凹土纳米氧化锌可提高仔猪生长性能，降低腹泻率，改善仔猪生长发育，同时可降低血液 TG 和 TC 含量，提高血液 HDL 含量，加强脂代谢和胰腺器官发育，可替代抗生素和高锌的使用。

关键词：凹土纳米氧化锌；断奶仔猪；生长性能；器官指数；血液生化指标

中图分类号：S816

收稿日期：2017－09－30

基金项目：江苏省高校研究生创新工程项目（XSJCX17-035）；扬州大学镇江高新技术研究院开放课题（02）；扬州市自然科学基金（青年）（YZ2016115）；扬州市产学研合作专项（市校合作）（YZ2016257）；江苏省基础研究计划（自然科学基金）－青年基金项目（BK20170490）；江苏现代农业（生猪）产业技术体系海门推广示范基地项目[SXGC(2017)085]；江苏省苏北发展计划（BN2015073，BN2016095）

作者简介：毛俊舟（1993—），男，安徽六安人，硕士研究生，从事单胃动物营养研究。E-mail: 781446817@qq.com

*通信作者：喻礼怀，副教授，硕士生导师，E-mail: 952163339@qq.com

仔猪断奶时肠道发育不完善、机体免疫功能低下，易引起断奶应激综合征，导致肠道菌群紊乱和腹泻，严重影响仔猪生长发育[1]。抗生素和高锌因能有效缓解仔猪断奶应激造成的不利影响被广泛应用于生产实践[2]。但是，研究人员发现使用抗生素和高锌有诸多弊端，如抗生素导致的药物残留、细菌耐药性等；动物饲用高剂量的锌，锌由于消化率低会随着粪便大量排出体外，造成资源浪费和环境污染[3]，欧盟、荷兰和美国等多个国家已经限定仔猪饲料中锌的添加量。因此，探索锌的合理利用方法，积极寻找有效缓解仔猪断奶应激的抗生素替代品势在必行。在已知方法中，使用纳米氧化锌是替代传统氧化锌的潜在可行方案，与传统氧化锌比，纳米氧化锌效果更加显著[4]。纳米氧化锌具有颗粒小、比表面积大、吸收率高等特性，其粒径为 1～100 nm，能够调节动物免疫力和繁殖性能[5]。研究已经证明饲粮中添加 200~1 000 mg/kg 纳米氧化锌对家畜和家禽均具有不同程度促生长作用，能够改善动物机体肠道黏膜形态、降低腹泻率等，还能够刺激生物体细胞、体液及非特异免疫功能，提高机体抗病能力[6-8]；Zhao 等[9]研究发现饲喂肉鸡 60 mg/kg 纳米氧化锌能够提高后期日增重；Long 等[10]在断奶仔猪饲粮中添加 500 mg/kg 纳米氧化锌发现能够显著提高日增重、日采食量，降低腹泻率，效果优于 3 000 mg/kg 氧化锌。但高剂量纳米氧化锌具有毒性负作用[11]。

凹凸棒土（attapulgite）简称凹土，又称为坡缕石（palygorskite），是一种以硅酸盐为主要成分的黏土矿[理论化学式为 $Si_8Mg_5O_{20}(OH)_{2.4}H_2O$]，无毒、无味、无刺激性，廉价易得。凹土具有表面多孔、比表面积大、阳离子可交换特性，且对铅离子（Pb^{2+}）、铜离子（Cu^{2+}）、抗生素等具有良好的吸附效果[12-15]。此外，有研究表明黏土类矿物质是一种控释载体，能够控制生物活性分子、药物及营养素等物质的释放[16-18]。因此，凹土自 2011 年起被列入饲料添加剂名单[19]。研究发现，在断奶仔猪饲粮中添加 2 000 mg/kg 凹土能显著提高仔猪平均日采食量，提高饲料转化率，且有效改善仔猪肠道健康[20]；Tang 等[21]发现饲粮中添加 1 800 mg/kg 凹土能显著增加仔猪平均日增重，减少腹泻，促进仔猪生长，提高经济效益。但大量研究表明，凹土添加剂量过高，会影响仔猪生长发育[21-23]。前人研究均局限于添加高剂量凹土，尚未发现低剂量凹土在仔猪中使用效果，同时有关 500~1 000 mg/kg 纳米氧化锌在仔猪饲粮中添加效果褒贬不一。因此，本试验立足于前人研究结果，结合实际生产成本考虑，将同比例低剂量凹土与不同水平纳米氧化锌颗粒结合，组成凹土纳米氧化锌，并通过在断奶仔猪饲粮中添加凹土纳米氧化锌，探索低剂量凹土和纳米氧化锌结合体在断奶仔猪饲养前期的适宜添加量和替代抗生素及高锌成为新型绿色健康添加剂的可能性。

1 材料与方法

1.1　试验材料

本试验所用氧化锌（白色粉末状）、纳米氧化锌（白色粉末状，纯度≥99%，平均粒径 45 nm）和凹土纳米氧化锌（纯度为 85%，由 80%纳米氧化锌和 20%凹土组成，其中纳米氧化锌理化特性同上，凹土主要成分为硅酸盐，双层链状结构）由扬州大学化工学院提供；50%喹乙醇、15%金霉素、10%硫酸黏菌素由扬州大学饲料厂提供；试验仔猪为 21 日龄杜×长×大断奶仔猪，由苏州市太仓金诸农业发展有限公司提供。

试验所用硫酸黏菌素为 2016 年 9 月生产，根据中华人民共和国农业部公告第 2428 号规定可使用至 2017 年 4 月 30 日，本试验时间符合使用标准。且以上材料仅限于试验研究使用，旨在替代抗生素的使用。

1.2　试验设计

试验选取 21 日龄体重相近[（6.30±0.51） kg]的健康杜×长×大断奶仔猪 210 头，随机分为 7 组，分别为对照组（CON 组，饲喂基础饲粮）、抗生素组（ANT 组，饲喂基础饲粮+100 mg/kg 50%喹乙醇+150 mg/kg 15%金霉素+50 mg/kg 10%硫酸黏菌素）、氧化锌组（ZO 组，饲喂基础饲粮+3 000 mg/kg 氧化锌）、纳米氧化锌组（NZO 组，饲喂基础饲粮+800 mg/kg 纳米氧化锌）、低凹土纳米氧化锌组（LA-ZO 组，饲喂基础饲粮+700 mg/kg 凹土纳米氧化锌）、中凹土纳米氧化锌组（MA-ZO 组，饲喂基础饲粮+1 000 mg/kg 凹土纳米氧化锌）和高凹土纳米氧化锌组（HA-ZO 组，饲喂基础饲粮+1 300 mg/kg 凹土纳米氧化锌），每组 6 个重复，每个重复 5 头猪。试验于 2017 年 4 月在江苏省太仓金诸种猪场进行，试验预试期 3 d，正试期 9 d。

1.3　饲养管理及试验饲粮

猪场属于规模化生产，设备齐全，防疫及管理措施完善。试验仔猪均在同一舍内饲养，饲粮为粉料，仔猪自由采食（每日饲喂 4 次，饲喂时间分别为 06：30、10：30、14：30 和 18：30，每次添加量以料槽中略有剩余为宜），自由饮水。每天清扫栏舍，保持栏内卫生，自然通风，日常管理、消毒与防疫按照猪场常规程序进行。

试验基础饲粮参照 NRC（2012）仔猪营养需要标准并结合生产实践配制，其组成和营养水平见表 1。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredient	
玉米 Corn	60.41
麸皮 Bran	4.00

玉米蛋白粉 Corn gluten meal	3.00
大豆油 Soybean oil	1.00
豆粕 Soybean meal	28.00
石粉 Limestone	1.26
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.30
L–赖氨酸 *L*-Lys	0.15
蛋氨酸 Met	0.02
植酸酶 Phytase	0.01
食盐 NaCl	0.35
预混料 Premix[1)]	0.50
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
消化能 DE/（MJ/kg）	13.39
粗蛋白质 CP	20.45
钙 Ca	0.85
有效磷 AP	0.35
赖氨酸 Lys	1.10
蛋氨酸＋半胱氨酸 Met+Cys	0.69
苏氨酸 Thr	0.78

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kilogram of the diet：VA 6 000 IU,VD_3 3 400 IU,VE 30 mg,VK_3 2 mg,VB_1 3.5mg,VB_2 5.5 mg,VB_6 3.5 mg,VB_{12} 25.0 μg,生物素 biotin 0.05 mg,叶酸 folic acid 0.3 mg,*D*–泛酸 *D*-pantothenic acid 20 mg,烟酸 niacin 20 mg,氯化胆碱 choline chloride 500 mg,Fe (as ferrous sulfate) 110 mg,Zn(as zinc sulfate) 100 mg,Cu (as copper sulfate) 20 mg,Mn (as manganese sulfate) 40 mg,Se (as sodium selenite) 0.30 mg,I (as potassium iodide) 0.40 mg。

[2)] 营养水平为计算值。Nutrient levels were calculated values.

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长性能

试验期间，全程以重复为单位记录采食量，试验第 1 天和结束当天 08：00 对每头仔猪空腹称重，计算平均日增重(ADG)、平均日采食量(ADFI)及料重比(F/G)。

1.4.2 腹泻率及腹泻指数

试验期内每天 07：00 观察仔猪粪便，按照 Castillo 等[24]的方法对粪便进行评分。0 分：粪便条形或粒状；1 分：软粪、能成形；2 分：稠装、不成形、粪水未分离；3 分：液状、不成形、粪水分离。当粪便评分为 2 或以上时认为仔猪发生腹泻。计算试验期内各组腹泻率和腹泻指数，计算公式如下：

腹泻率（%）=100×试验期内每组仔猪腹泻头次/(试验天数×每组仔猪头数)；

腹泻指数=100×试验期内每组仔猪腹泻总评分/每组仔猪头数。

1.4.3 器官指数

试验结束当天屠宰，采血后，取心脏、肝脏、脾脏、肺脏、肾脏、胸腺、胰腺，吸水纸吸干表明多余血液，立即称重，记录，计算各器官指数。

器官指数（g/kg）=器官湿重（g）/猪活体重（kg）。

1.4.4 血液生化指标

在试验结束当天 08：00，每个重复随机选取 1 头体重接近平均体重的仔猪，空腹前腔静脉采血 3 mL 于抗凝管中，测定血液中碱性磷酸酶（ALP）和乳酸脱氢酶（LDH）活性以及总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）、球蛋白（GLB）、甘油三酯（TG）、总胆固醇（TC）、高密度脂蛋白（HDL）和低密度脂蛋白（LDL）含量，并计算白球比(A/G)。

1.5 数据统计与处理

先用 Excel 2010 对试验数据进行初步整理，再用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，用 Duncan 氏法对各组间平均数进行多重比较，以 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能的影响

由表 2 可知，饲粮中添加抗生素、氧化锌、纳米氧化锌和凹土纳米氧化锌对断奶仔猪末重及 F/G 无显著影响（$P>0.05$）；与 CON 组相比，饲粮添加凹土纳米氧化锌显著提高断奶仔猪 ADFI（$P<0.05$），显著提高 ADG（$P<0.05$）；此外，HA-ZO 组 ADFI 较 ANT 组提高 34.78%（$P<0.05$）。

表 2 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能的影响

Table 2 Effects of attapulgite nano zinc oxide on growth performance of weaned piglets

项目 Items	组别 Groups							SEM	*P* 值 *P*-value
	CON	ANT	ZO	NZO	LA-ZO	MA-ZO	HA-ZO		
初重 Initial weight/kg	6.36	6.32	6.31	6.31	6.33	6.35	6.34	0.01	0.887
末重 Final weight/kg	7.18	7.34	7.44	7.45	7.65	7.59	7.65	0.06	0.168
平均日采食 ADFI/g	117.41^{c}	143.44^{bc}	168.52^{ab}	158.52^{ab}	176.30^{ab}	180.37^{a}	193.33^{a}	6.31	0.004
平均日增重 ADG/g	90.56^{b}	114.45^{ab}	125.19^{ab}	126.30^{ab}	147.04^{a}	138.52^{a}	144.81^{a}	5.92	0.045
料重比 F/G	1.30	1.26	1.38	1.25	1.25	1.34	1.37	0.04	0.726

同行数据肩标不同字母表示差异显著（$P<0.05$），肩标相同字母或无字母表示差异不显著（$P>0.05$）。

下表同。

In the same row, values with different letter superscripts mean significant difference （$P<0.05$）, while with the same letter or no letter superscripts mean no significant difference （$P>0.05$）. The same as below.

2.2 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪腹泻的影响

由表 3 可知，与 CON 组相比，LA-ZO 组、HA-ZO 组断奶仔猪腹泻率显著降低（$P<0.05$），且 LA-ZO 组腹泻率显著低于 ANT 组（$P<0.05$）。与 CON 组相比，凹土纳米氧化锌组腹泻指数均显著降低（$P<0.05$）；与 ANT 组和 NZO 组相比，LA-ZO 组断奶仔猪腹泻指数显著降低（$P<0.05$）。

表 3 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪腹泻的影响

Table 3 Effects of attapulgite nano zinc oxide on diarrhea of weaned piglets

项目 Items	组别 Groups							SEM	P 值 P-value
	CON	ANT	ZO	NZO	LA-ZO	MA-ZO	HA-ZO		
腹泻率 Diarrhea rate/%	6.67^{a}	5.19^{ab}	3.33^{bc}	3.70^{bc}	2.59^{c}	4.81^{abc}	3.70^{bc}	0.36	0.021
腹泻指数 Diarrhea index	2.97^{a}	2.23^{b}	1.63^{bc}	2.23^{b}	1.50^{c}	1.70^{bc}	2.03^{bc}	0.12	0.003

2.3 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪器官指数的影响

由表 4 可知，与 CON 组相比，饲粮中添加不同水平的凹土纳米氧化锌对断奶仔猪心脏、肝脏、脾脏、肺脏、肾脏、胸腺器官指数均无显著影响（$P>0.05$）；与 ANT 组和 NZO 组相比，随着凹土纳米氧化锌添加剂量增加，心脏指数有上升趋势（$P>0.05$）；与 NZO 组相比，LA-ZO 组和 MA-ZO 组胰腺指数显著增加（$P<0.05$）。

表 4 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪器官指数的影响

Table 4 Effect of attapulgite nano zinc oxide on organ indices of weaned piglets g/kg

项目 Items	组别 Groups							SEM	P 值 P-value
	CON	ANT	ZO	NZO	LA-ZO	MA-ZO	HA-ZO		
心脏 Heart	5.74	4.97	5.33	4.90	5.17	5.29	5.46	0.08	0.079
肝脏 Liver	31.01	28.23	28.87	26.79	28.00	27.14	30.34	0.48	0.149
脾脏 Spleen	2.23	2.51	2.79	2.52	2.43	2.75	3.28	0.13	0.442
肺脏 Lungs	14.71	11.80	13.58	14.63	14.34	12.60	12.09	0.54	0.647
肾脏 Kidneys	6.53	6.39	6.00	6.16	5.93	5.72	5.96	0.10	0.407
胸腺 Thymus	1.33	0.97	1.12	0.90	0.86	1.03	1.06	0.05	0.112
胰腺 Pancreas	2.11^{ab}	1.66^{ab}	1.83^{ab}	1.45^{b}	2.30^{a}	2.29^{a}	1.46^{b}	0.09	0.026

2.4 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪血液生化指标的影响

由表 5 可知，与 CON 组相比，饲粮中添加不同水平的凹土纳米氧化锌对断奶仔猪血

液 ALP、LDH 活性和 TP、ALB、GLB、LDL 含量以及 A/G 均无显著影响（$P>0.05$）。与 CON 组相比，LA-ZO 组和 MA-ZO 组血液 TG 含量显著降低（$P<0.05$）。MA-ZO 组血液 TC 含量与 CON 组相比降低 23.04%（$P<0.05$），与 ZO 组相比降低 25.94%（$P<0.05$）。LA-ZO 组血液 HDL 含量与 CON 组、ANT 组和 NZO 组相比无显著差异（$P>0.05$），但显著低于 ZO 组（$P<0.05$）；MA-ZO 组血液 HDL 含量与 CON 组和 ANT 组相比均提高 54.55%（$P<0.05$）；相比于 CON 组、ANT 组，HA-ZO 组血液 HDL 含量均提高 16.36%（$P<0.05$）。

表 5　凹土纳米氧化锌对断奶仔猪血液生化指标的影响

Table 5　Effects of attapulgite nano zinc oxide on blood biochemical indices of weaned piglets

项目	组别 Groups							SEM	*P* 值
Items	CON	ANT	ZO	NZO	LA-ZO	MA-ZO	HA-ZO		*P*-value
碱性磷酸酶 ALP/（U/L）	390.20	399.00	498.00	395.00	359.33	434.00	394.20	19.64	0.592
总蛋白 TP/(g/L)	55.86	49.56	51.35	53.93	50.60	56.53	51.76	0.94	0.393
白蛋白 ALB/(g/L)	27.54	27.56	25.60	26.73	26.40	25.18	27.26	0.45	0.775
球蛋白 GLB /(g/L)	28.32	22.00	25.75	27.20	24.20	29.45	24.50	0.97	0.508
白球比 A/G	1.03	1.27	1.06	1.06	1.11	0.92	1.15	0.05	0.703
乳酸脱氢酶 LDH/(U/L)	1 031.00	951.60	1 186.17	1 014.67	1 011.00	1 050.50	1 033.00	26.92	0.373
甘油三酯 TG/(mmol/L)	0.83[a]	0.51[bc]	0.48[bc]	0.43[c]	0.50[bc]	0.40[c]	0.68[ab]	0.03	0.002
总胆固醇 TC/(mmol/L)	2.04[ab]	1.72[bc]	2.12[a]	1.91[abc]	1.74[bc]	1.57[c]	1.98[ab]	0.05	0.022
高密度脂蛋白 HDL/(mmol/L)	0.55[c]	0.55[c]	0.73[ab]	0.61[bc]	0.52[c]	0.85[a]	0.64[ab]	0.03	<0.001
低密度脂蛋白 LDL/(mmol/L)	1.20	1.04	1.28	1.16	1.09	1.05	1.19	0.04	0.551

3　讨　论

3.1　凹土纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能的影响

仔猪早期断奶导致肠道发育不完善，对营养物质消化吸收率低，腹泻频率高，严重影响其生长发育，而采食量和饲料转化率是决定断奶仔猪生长速度的主要因素[25-26]。有研究表明，凹土和纳米氧化锌能有效缓解仔猪断奶应激，提高仔猪生长性能。Wang 等[27]等指出在断奶仔猪饲粮中添加 1 200 mg/kg 纳米氧化锌相比于添加硫酸黏杆菌素－氧化锌混合物改善了肠道屏障功能，从而保护肠道，降低了腹泻率，且研究发现仔猪组织和排泄物中锌的含量更低，说明减少了锌的富集，提高了锌的吸收利用，从而饲用少量纳米氧化锌达到高剂量传统氧化锌的效果。Long 等[10]研究表明，饲粮中添加 500 mg/kg 纳

米氧化锌能显著提高断奶仔猪 ADG、ADFI 和饲料转化率，与 3 000 mg/kg 氧化锌作用效果相当。孟艳莉[28]研究发现在 1~21 日龄和 22~42 日龄仔猪饲粮中添加 3 000 mg/kg 凹土能提高肠道内消化酶活性，促进糖类物质转化，加快营养物质消化，从而提高仔猪 ADG 和 ADFI。从本试验结果看，减少凹土使用量也能够达到上述相似结论，不同的是本试验所用添加剂非单一物质，低剂量凹土所具体的功效有待进一步研究。本试验研究凹土与纳米氧化锌颗粒结合的凹土纳米氧化锌的应用效果，发现与 CON 组相比，凹土纳米氧化锌能显著提高断奶仔猪 ADG 和 ADFI，且 LA-ZO 组和 MA-ZO 组 ADG 和 ADFI 与 ZO 组效果相当，同时 LA-ZO 组改善生长性能方面优于 ANT 组，促生长功效在数值上优于 NZO 组，且 F/G 最低，说明降低锌和凹土的使用量能够维持相近效果，这与前人研究结果相似，但不同的是随着凹土纳米氧化锌剂量的增加，饲料转化率逐渐降低。已有研究发现，凹土棒土具有黏性、流变性及离子交换性，能够形成胶状薄膜，提高凹土在仔猪肠道内存留时间，改善绒毛生长[18,20,28-29]，因此我们推测出现此试验结果的一个可能原因是凹土能够形成胶状薄膜，覆盖于肠道黏膜表面，减少了黏膜的损伤以及与有害物质的接触，保证了黏膜完整性，并且随着凹土与黏膜的紧密接触，使凹土携带的纳米氧化锌微粒逐渐被肠道吸收，而且凹土本身携带的离子能够与消化道中离子发生置换反应，置换出的离子可能被肠道吸收后促进各种消化酶的释放，加快饲粮的转化吸收，进而提高断奶仔猪生长性能；但随着凹土纳米氧化锌剂量的增加，仔猪肠道黏膜表面可能会覆盖过量凹土纳米氧化锌，反过来阻碍了营养物质的消化吸收，从而降低了饲料转化率，但未达到显著水平。此外，纳米氧化锌还能够提高回肠中 Lgr5 和 Bmil 干细胞的增值速度，这类细胞增值加快能促进肠道上皮细胞更新，改善肠道吸收和利用营养物质[30-31]。因此，凹土和纳米氧化锌共同作用于肠道，从而促进仔猪生长发育。

3.2　凹土纳米氧化锌对断奶仔猪腹泻的影响

仔猪断奶后，因机体防御系统不完善，对外界不良环境抵抗力差，易应激引起肠道菌群紊乱，降低肠道优势菌群对大肠杆菌等有害菌的抑制，使其大量定植，从而导致腹泻[32]。研究发现，凹土在治疗人类和反刍动物腹泻中效果良好[33-35]，但在仔猪上应用较少。纳米氧化锌在断奶仔猪中应用较多，且效果良好，能有效降低腹泻发生频率[25-26]。Hu 等[1]研究发现，在断奶仔猪饲粮中添加 500 和 750 mg/kg 蒙脱石–氧化锌混合物（锌的含量为 25%）能显著降低 4~14 日龄断奶仔猪腹泻指数，其中 500 mg/kg 蒙脱石–氧化锌混合物与 2 000 mg/kg 氧化锌添加量效果相当，并指出 500 和 750 mg/kg 蒙脱石–氧化锌混合物能够改善肠道黏膜完整性并提高胰腺和小肠内的消化酶活性，加快营养物质分解，减缓固态饲粮对肠道的持续刺激，从而降低仔猪腹泻。韩萌[31]在断奶仔猪饲粮中分别添

加 2 000 mg/kg 传统氧化锌和 500 mg/kg 纳米氧化锌对比发现，2 组腹泻发生率均显著降低，并且纳米氧化锌组与传统氧化锌组无差异，主要原因是纳米氧化锌能显著降低仔猪肠道通透性，提高回肠和结肠的绒毛高度与绒隐比，改善肠道环境。本试验结果提示，饲粮中添加 3 个水平凹土纳米氧化锌均能有效降低断奶仔猪腹泻率及腹泻指数，添加剂量为 700 mg/kg 时腹泻率及腹泻指数最低，低于 3 000 mg/kg 氧化锌组和 800 mg/kg 纳米氧化锌组，显著优于 ANT 组，即低剂量凹土纳米氧化锌的添加抗腹泻效果良好。140 mg/kg 的凹土根据其性质且与纳米氧化锌结合，可能因此能够与添加 200 mg/kg 凹土达到相同止泻效果；1 000 mg/kg 添加量时腹泻指数与 3 000 mg/kg 氧化锌相近，这些结果与 Hu 等[1]研究结果相似。由此可知：饲粮中添加 700 mg/kg 凹土纳米氧化锌抗腹泻效果最佳。饲粮中添加凹土纳米氧化锌能有效降低仔猪腹泻率的原因可能是凹土携带的纳米氧化锌能够提高肠道黏膜蛋白 Occludin、Claudin 的表达，这类蛋白有利于肠道物理屏障的修复，且纳米氧化锌能够杀死大肠杆菌等革兰氏阴性菌以及抗高温高压孢子，协助肠道有益菌的定植并成为优势菌群[36]。此外，凹土具有吸附性，能够吸附霉菌毒素，保护肠道屏障，两者相互协同，共同维护肠道完整性与菌群稳定，减少腹泻[37]。本试验在饲养过程中发现 CON 组及 ANT 组多为轻度腹泻和软便，因此腹泻率较高，但抗生素对仔猪生长具有促进效果，能够改善饲料利用率，从而 F/G 低于 CON 组；高剂量氧化锌能缓解仔猪腹泻，但可能影响仔猪对营养物质吸收转化从而降低了饲料转化率。

3.3 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪器官指数的影响

内脏器官是动物机体重要组成成分，维持机体正常生长发育，抵抗外界环境变化和病原侵入。器官指数能够体现动物各器官生长发育、新陈代谢、功能、健康状态等情况是否正常，从而反映出动物生长性能和生理状况等，而胰腺是胃肠道的重要组成部分，其分泌的内源消化酶活性影响胃肠道对饲料中营养物质的吸收与利用[38]。组织器官的良好发育是动物机体缓解应激的重要因素，能够影响仔猪生长发育及营养物质的吸收。本试验结果提示，相比于添加 800 mg/kg 纳米氧化锌，饲粮中添加 700 和 1 000 mg/kg 凹土纳米氧化锌能够显著提高仔猪胰腺重量，且略高于 CON 组，但随着凹土纳米氧化锌添加剂量的增加，胰腺指数越来越低。已有研究发现，高剂量纳米氧化锌会对小鼠器官生长产生毒性作用，影响小鼠发育[12]。因此我们猜测这可能是因为锌添加量的提高，会抑制胰腺中某些抗应激相关酶的活性和含量或部分干细胞的分化，加剧了胰腺氧化应激，对器官生长产生负作用，导致胰腺发育受损，而凹土具有一定缓解损伤作用，其具体作用机制有待进一步研究发现；心脏指数则随着凹土纳米氧化锌添加剂量的增加有增加趋势，且高于 ANT 组，但均与 CON 组间无显著差异，表明凹土纳米氧化锌对断奶仔猪心脏发

育无显著影响，且对其他器官生长也无显著作用。

3.4 凹土纳米氧化锌对断奶仔猪血液生化指标的影响

血液是机体内环境重要组成部分，血液生化指标的变化能够间接反映出机体内器官组织和新陈代谢的变化，良好的新陈代谢能够促进仔猪对营养物质的吸收以及各种酶类的释放，从而维持机体营养平衡，改善仔猪生长性能，提高生产效益。TG 由脂肪分解或某些糖类转化得到，能够为机体提供能量，血清中 TG 含量的高低能够反映脂肪分解和体脂变化情况，TG 含量下降，则脂肪分解加强或转化为体脂增强，适量 TG 有利于机体内环境稳态[39]。TC 是一种脂类物质，是多种类固醇激素的合成材料，其含量能够反映机体内脂类物质的吸收和代谢状况。孟艳莉[28]研究表明在断奶仔猪饲粮中添加 3 000 mg/kg 凹凸棒石对仔猪血液中 TG 含量无显著影响；徐奇友等[41]研究指出，肉鸡饲粮中添加 40 mg/kg 纳米氧化锌在 28 日龄后血清中的 TC 含量显著降低。本试验在仔猪饲粮中添加 1 000 mg/kg 凹土纳米氧化锌结果显示，血清中 TC 含量与后者研究结果相似，与前者结果不同，可能的原因是凹土对血液中 TG 和 TC 的含量无显著影响，但纳米氧化锌能够影响它们的生成和转化，适量降低 TG 和 TC 含量，从而促进仔猪脂肪分解和脂类物质的转化与吸收，提高能量利用率，改善生长性能。HDL 具有重要的转运功能，能够将胆固醇转运到肾上腺等组织进行代谢，还能将其从周围组织转运到肝脏以胆酸形式排泄，缓解动脉粥样硬化[42]。王彬等[43]发现，饲粮中添加 150 和 300 mg/kg 纳米氧化锌能增加断奶仔猪血清中 HDL 含量，但与高锌组无显著差异，并指出新型纳米氧化锌能够提高饲粮中粗蛋白质的吸收利用率，促进仔猪生长。本试验结果提示，1 000 mg/kg 凹土纳米氧化锌的添加剂量能显著提高血液中 HDL 含量，且显著高于 ANT 组，但与 ZO 组差异不显著，说明凹土纳米氧化锌能够提高血液中 HDL 合成速率，加快胆固醇转化，加快组织间物质转运，促进营养物质代谢与吸收，从而提高动物生产性能。

4 结　论

① 饲粮中添加凹土纳米氧化锌可显著提高断奶仔猪 ADG 和 ADFI，降低仔猪腹泻率，改善仔猪生长性能，但随着添加剂量的增加，F/G 逐渐提高。

② 饲粮中添加 1 000 mg/kg 凹土纳米氧化锌可显著降低血液 TG 和 TC 含量，显著提高血液 HDL 含量，促进脂肪分解，加快胆固醇等脂类物质转化，促进脂代谢。

③ 综合本试验结果，700 mg/kg 凹土纳米氧化锌在提高断奶仔猪生长性能和降低腹泻率方面可替代抗生素、800 mg/kg 纳米氧化锌和 3 000 mg/kg 氧化锌，并以低剂量锌应用于断奶仔猪饲粮中，可提高生产效益，因此本试验推荐凹土纳米氧化锌适宜添加量为 700 mg/kg。

参考文献：

[1] HU C H,SONG J,YOU Z T,et al.Zinc oxide-montmorillonite hybrid influences diarrhea,intestinal mucosal integrity,and digestive enzyme activity in weaned pigs[J].Biological Trace Element Research,2012,149(2):190–196.

[2] HOFER U.Microbiome:effects of in-feed antibiotics on pig microbiota[J].Nature Reviews Microbiology,2014,12(4):234–234.

[3] BARTON M D.Antibiotic use in animal feed and its impact on human health[J].Nutrition Research Reviews,2000,13(2):279–299.

[4] SAHOO A,SWAIN R K,MISHRA S K.Effect of inorganic,organic and nano zinc supplemented diets on bioavailability and immunity status of broilers[J].International Journal of Advanced Research,2014,2(11):828–837.

[5] SWAIN P S,RAJENDRAN D,RAO S B N,et al.Preparation and effects of nano mineral particle feeding in livestock:a review[J].Veterinary World,2015,8(7):888–891.

[6] 田丽娜,姜建阳,朱风华,等.纳米氧化锌对肉鸡生长性能和屠宰性能的影响[J].中国农学通报,2009,25(2):1–5.

[7] MISHRA A,SWAIN R K,MISHRA S K,et al.Growth performance and serum biochemical parameters as affected by nano zinc supplementation in layer chicks[J].Indian Journal of Animal Nutrition,2014,31(4):384–388.

[8] SAHOO A,SWAIN R K,MISHRA S K,et al.Serum biochemical indices of broiler birds fed on inorganic,organic and nano zinc supplemented diets[J].International Journal of Recent Scientific Research,2014,5(11):2078–2081.

[9] ZHAO C Y,TAN S X,XIAO X Y,et al.Effects of dietary zinc oxide nanoparticles on growth performance and antioxidative status in broilers[J].Biological Trace Element Research,2014,160(3):361–367.

[10] LONG L N,CHEN J S,ZHANG Y G,et al.Comparison of porous and nano zinc oxide for replacing high-dose dietary regular zinc oxide in weaning piglets[J].PLoS One,2017,12(8):e0182550.

[11] SWAIN P S,RAO S B N,RAJENDRAN D,et al.Nano zinc,an alternative to conventional zinc as animal feed supplement:a review[J].Animal Nutrition,2016,2(3):134–141.

[12] WANG B,FENG W Y,WANG M,et al.Acute toxicological impact of nano-and submicro-scaled zinc oxide powder on healthy adult mice[J].Journal of Nanoparticle

Research,2008,10(2):263–276.

[13] CHEN H,WANG A Q.Kinetic and isothermal studies of lead ion adsorption onto palygorskite clay[J].Journal of Colloid and Interface Science,2007,307(2):309–316.

[14] WANG W B,TIAN G Y,ZHANG Z F,et al.A simple hydrothermal approach to modify palygorskite for high-efficient adsorption of methylene blue and Cu(II) ions[J].Chemical Engineering Journal,2015,265:228–238.

[15] ZHOU S Y,XUE A L,ZHANG Y,et al.Novel polyamidoamine dendrimer-functionalized palygorskite adsorbents with high adsorption capacity for Pb^{2+} and reactive dyes[J].Applied Clay Science,2015,107:220–229.

[16] BERHANE T M,LEVY J,KREKELER M P S,et al.Adsorption of bisphenol A and ciprofloxacin by palygorskite-montmorillonite:effect of granule size,solution chemistry and temperature[J].Applied Clay Science,2016,132–133:518–527.

[17] MONTE M B M,MIDDEA A,PAIVA P R P,et al.Nutrient release by a Brazilian sedimentary zeolite[J].Anais da Academia Brasileira de Ciências,2009,81(4):641–653.

[18] RAHIMI M,MOBEDI H,BEHNAMGHADER A,et al.Fat-soluble vitamins release based on clinoptilolite zeolite as an oral drug delivery system[J].Letters in Drug Design & Discovery,2012,9(2):213–217.

[19] THE EUROPEAN COMMISSION.Commission regulation (EU) 575/2011 of 16 June 2011 on the catalogue of feed materials[J].Official Journal of the European Union,2011,159:25–65.

[20] ZHANG J M,LV Y F,TANG C H,et al.Effects of dietary supplementation with palygorskite on intestinal integrity in weaned piglets[J].Applied Clay Science,2013,86:185–189.

[21] TANG C H,WANG X Q,ZHANG J M.Effects of supplemental palygorskite instead of zinc oxide on growth performance,apparent nutrient digestibility and fecal zinc excretion in weaned piglets[J].Animal Science Journal,2014,85(4):435–439.

[22] LV Y F,TANG C H,WANG X Q,et al.Effects of dietary supplementation with palygorskite on nutrient utilization in weaned piglets[J].Livestock Science,2015,174:82–86.

[23] ZHANG L,YAN R,ZHANG R Q,et al.Effect of different levels of palygorskite inclusion on pellet quality,growth performance and nutrient utilization in broilers[J].Animal Feed Science and Technology,2017,223:73–81.

[24] CASTILLO M,MARTÍN-ORÚE S M,TAYLOR-PICKARD J A,et al.Use of mannan-oligosaccharides and zinc chelate as growth promoters and diarrhea preventative in weaning pigs:effects on microbiota and gut function[J].Journal of Animal Science,2008,86(1):94–101.

[25] DUNSHEA F R.Sexual dimorphism in growth of sucking and growing pigs[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2001,14(11):1610–1615.

[26] SPREEUWENBERG M A M,VERDONK J,GASKINS H R,et al.Small intestine epithelial barrier function is compromised in pigs with low feed intake at weaning[J].The Journal of Nutrition,2001,131(5):1520–1527.

[27] WANG C,ZHANG L G,SU W P,et al.Zinc oxide nanoparticles as a substitute for zinc oxide or colistin sulfate:Effects on growth,serum enzymes,zinc deposition,intestinal morphology and epithelial barrier in weaned piglets[J].PLoS One,2017,12(7):e0181136.

[28] 孟艳莉.凹凸棒石、蒙脱石及其复合物对断奶仔猪肠道的保护作用研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2011.

[29] 罗友文,周岩民,王恬.凹凸棒石粘土的生物学功能及其在动物生产上的应用[J].硅酸盐通报.2006,25(6):159–164.

[30] 肖金松,罗有文.凹凸棒石黏土在动物生产上的应用及其作用机制[J].江西农业学报,2008,20(10):97–99.

[31] 韩萌.纳米氧化锌对断奶仔猪肠道菌群平衡及黏膜免疫的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业大学,2017.

[32] LI Y,GUO W,HAN S S,et al.The evolution of the gut microbiota in the giant and the red pandas[J].Scientific Reports,2015,5:10185.

[33] KATOULI M,MELIN L,JENSEN-WAERN M,et al.The effect of zinc oxide supplementation on the stability of the intestinal flora with special reference to composition of coliforms in weaned pigs[J].Journal of Applied Microbiology,1999,87(4):564–573.

[34] 红玮,王贺,童春晖.具有药用前景的天然矿物—凹凸棒石[J].药学进展,2005,29(1):43–45.

[35] ROUSSEL A J,Jr.,BRUMBAUGH G W.Treatment of diarrhea of neonatal calves[J].Veterinary Clinics of North America:Food Animal Practice,1991,7(3):713–728.

[36] ARABI F,IMANDAR M,NEGAHDARY M,et al.Investigation anti-bacterial effect of zinc

oxide nanoparticles upon life of Listeria monocytogenes[J].Annals of Biological Research,2012,3(7):3679–3685.
[37] 梁晓维,李发弟,张军民,等.蒙脱石和凹凸棒石对霉菌毒素吸附性能的研究[J].中国畜牧兽医,2014,41(11):133–138.
[38] 黄强,徐稳,王恬,等.日粮补充亮氨酸对超早期断奶宫内发育迟缓仔猪内源消化酶活性及胰腺抗氧化能力的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(1):123–129.
[39] ZIMMERMANN R,STRAUSS J G,HAEMMERLE G,et al.Fat mobilization in adipose tissue is promoted by adipose triglyceride lipase[J].Science,2004,306(5700):1383–1386.
[40] DUKES H H.The physiology of domestic animals[M].New York:Comstock Publishing Associates,1955.
[41] 徐奇友,刘立波,侯奉雨,等.纳米氧化锌对肉仔鸡血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2007,19(1):76–80.
[42] TOTH P P,DAVIDSON M H.Therapeutic interventions targeted at the augmentation of reverse cholesterol transport[J].Current Opinion in Cardiology,2004,19(4):374–379.
[43] 王彬,刘路杰,祝佳,等.纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能、血清免疫和生化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(11):3626–3633.

Effects of Attapulgite Nano Zinc Oxide on Growth Performance, Organ indices and Blood Biochemical Indices of Weaned Piglets

MAO Junzhou[1] DONG Li[1] WANG Shu'nan[1] PENG Zhong[1] ZHONG Zhaoxin[1] QU Guomin[2] YU Lihuai[1*]

(1. *College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou* 225009, *China*; 2. *Animal Disease Prevention and Control Center of Liyang, Changzhou* 213300, *China*)

Abstract: The experiment was conducted to explore the effects of attapulgite nano zinc oxide on the growth performance, organ indices and blood biochemical indices of weaned piglets. A total of 210 Duroc × Landrace×Yorkshire piglets with 21-day-old and similar body weight of (6.30±0.51) kg were randomly allocated into 7 groups with 6 replicates each and 5 pigs in each replicate. Pigs in the control group (CON group) were fed a basal diet, in antibiotic group (ANT group) were fed a basal diet supplemented with 100 g/kg 50% olaquindox, 150 g/kg 15% chlortetracycline and 50 g/kg 10% sulfate colistin, and in the other groups were fed the basal diet supplemented with 3 000 mg/kg zinc oxide (ZO group), 800 mg/kg nano-zinc oxide

(NZO group), and 700, 1 000 and 1 300 mg/kg attapulgite nano zinc oxide (LA-ZO group, MA-ZO group and HA-ZO group), respectively. The experiment lasted for 9 days after 3 days adaption. The results showed as follows: 1) compared with CON group, dietary attapulgite nano zinc oxide significantly increased the average daily feed intake and average daily gain of weaned piglets (P<0.05). 2) Compared with CON group and ANT group, the diarrhea rate in LA-ZO group was significantly decreased (P<0.05). The diarrhea index in LA-ZO group was significantly lower than that in CON group, ANT group and NZO group (P<0.05). 3) The pancreas index in LA-ZO group and MA-ZO group was significantly higher than that in NZO group (P<0.05). 4) Compared with CON group, the contents of blood total cholesterol (TC) and triglyceride (TG) in MA-ZO group was significantly decreased (P<0.05), and the blood high density lipoprotein content in MA-ZO group was significantly increased (P<0.05), which was significantly higher than that in ANT group and NZO group (P<0.05). The blood high density lipoprotein content in HA-ZO group was significantly higher than that in CON group and ANT group (P<0.05). The results indicate that dietary attapulgite nano-zinc oxide can improve the growth performance, decrease the diarrhea rate, and promote the growth and development of weaned piglets, meanwhile decrease the contents of TG and TC in blood, increase blood high density lipoprotein content, strengthen lipid metabolism and pancreatic organ development. Thus, it has potential to replace the utilization of antibiotics and high zinc for weaned piglets.

Key words: attapulgite nano zinc oxide; weaned piglets; growth performance; organ index; blood biochemical index

*Corresponding author, associate professor, E-mail: 952163339@qq.com　　　（责任编辑　田艳明）